جغرافیا و مخاطرات محیطی، شمارهٔ سی و سوم، بهار ۱۳۹۹

صص ۱۳۷-۱۱۷

DOI: https://doi.org/10.22067/geo.v9i1.84991

مقاله پژوهشی

ارائه مدل پیش‌بینی ریسک خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک با روش‌های آماری تحت تأثیر تغییرات اقلیمی (مطالعه موردی: زیرحوضه آبریز افین)

غزاله کواکبی - دانش‌آموخته دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

محمد موسوی بایگی[1] - استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

امین علیزاده - استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

ابوالفضل مساعدی - استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

مهدی جباری نوقابی - استادیار دانشکده علوم و ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۷ تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱/۲۶

چکیده

خشکسالی یکی از پدیده‌های طبیعی در اقلیم‌های مختلف با ویژگی تکرار شونده است که به علت داشتن ویژگی‌هایی نظیر شروع، خاتمه، شدت و فراوانی، دارای پیچیدگی‌هایی در مقایسه با سایر مخاطرات طبیعی است و گستره وسیعی از ابعاد محیط طبیعی و جوامع انسانی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد؛ ازجمله بخش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی. در این پژوهش سعی شده تا مدلی برای پیش‌بینی ریسک خشکسالی، ارائه و اقدامات لازم به‌منظور کاهش اثرات ناشی از آن انجام شود. بدین منظور از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPEI و eRDI و شاخص خشکسالی هیدرولوژیک (SRI) استفاده شد. به‌منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر این پدیده، دو سناریوی انتشار خوش‌بینانه و بدبینانه مورد بررسی قرار گرفت. دوره پایه این مطالعه ۲۰۱۵-۱۹۸۳ و دوره پیش‌بینی ریسک خشکسالی سال‌های ۲۱۰۰-۲۰۲۰ است. دو روش مدل‌سازی BQR و loess Nonparametric Regression برای مدل‌سازی ریسک خشکسالی استفاده شد. نتایج بدست‌آمده از این مطالعه حاکی از کاهش نسبی در وقوع دفعات خشکسالی در ۲۷ ساله آینده نزدیک در زیر حوضه آبریز افین است. همچنین مقایسه روش‌های مختلف نشان از مناسب بودن مدل رگرسیون ناپارامتری برای پیش‌بینی ریسک خشکسالی آینده را داشت.

کلیدواژه‌ها: مخاطره خشکسالی، آسیب‌پذیری خشکسالی، مدل‌های اقلیمی،RCP4.5، RCP8.5

---

۱ نویسنده مسئول ۰۹۱۵۳۱۶۷۳۱۱ Email: mousavib@um.ac.ir

۱- مقدمه

خشکسالی یکی از پدیده‌های طبیعی و مکرر اقلیمی در زمین است که اثرات متنوعی بر سایر بخش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ایجاد کرده است. پاندی و همکاران[1] در سال ۲۰۱۲ در مطالعه‌ی خود اعلام کردند که خشکسالی بر اساس تأثیر مستقیمی که بر زندگی انسان‌ها دارد، بالاترین رتبه در میان سایر مخاطرات طبیعی را دارد. تأثیر خشکسالی بر کشاورزی، دسترسی به آب و فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی در هر منطقه، به عوامل فیزیولوژیکی، محیطی و اجتماعی آن منطقه بستگی دارد؛ بنابراین آسیب‌پذیری خشکسالی بستگی به عوامل متعددی نظیر ویژگی‌های توپوگرافی، خاک، زمین مورد استفاده، توسعه منابع آب، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و نیاز آب منطقه‌ای برای فعالیت‌های داخلی، صنعتی و کشاورزی دارد (آرنل[2]،۱۹۹۹). ارزیابی تأثیرات خشکسالی در بخش‌های مختلف دشوار است، زیرا تأثیرات می‌تواند به صورت منطقه‌ای یا محلی باشد. همچنین، خشکسالی‌ها ممکن است برای مدت طولانی (یک یا چند سال) و یا مدت کوتاهی (چند هفته) اتفاق بیفتد (وو و وایت[3]،۲۰۰٤). خشکسالی یکی از بزرگ‌ترین خطرات طبیعی است که تأثیرات منفی گسترده‌ای بر محیط، اقتصاد و جامعه دارد (بچمایر و همکاران[4]، ۲۰۱۷). خشکسالی به دلیل کاهش بارندگی در یک دوره مشخص و کارآمد، منجر به کمبود آب می‌شود و خشکسالی هیدرولوژیکی به عنوان کاهش آب موجود در تمام اشکال آن تعریف می‌شود (ما و همکاران[5]، ۲۰۱۵). براساس تعریف برنامه استراتژی‌های بین‌المللی برای کاهش بلایا (۲۰۰۷)، ریسک خشکسالی حاصل قرار گرفتن یک منطقه در برابر یک واقعه خشکسالی با شدت و احتمال مشخص و تحت درجه‌ای معین از آسیب‌پذیری‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تعریف می‌شود. ازاین‌رو ارزیابی و مدیریت ریسک خشکسالی به منظور کاهش اثرات خشکسالی و برنامه‌ریزی مناسب برای خشکسالی‌های آینده امری مهم است (وایت[6]،۲۰۱۲). از سوی دیگر تغییرات اقلیمی، می‌تواند بر فراوانی و شدت وقوع واقعه خشکسالی تأثیرگذار باشد. براین اساس، آگاهی از تغییرات وضعیت ریسک خشکسالی به دلیل تأثیر از تغییرات احتمالی اقلیمی، می‌تواند گامی مهم در کاهش خسارات ناشی از خشکسالی در بخش‌های مختلف (اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و...) باشد. ریسک معمولاً به عنوان ترکیبی از احتمال رویداد یک واقعه (به‌عنوان‌مثال خشکسالی) و پیامدهای منفی آن شناخته می‌شود (شهید و بهروان، ۲۰۰۸، فن و همکاران[7]، ۲۰۱۷). مقدار واکنش و پاسخی که محیط به مخاطره می‌دهد بستگی به‌شدت مخاطره و میزان ویژگی-های محیطی دارد. این ویژگی‌های محیطی را می‌توان به چهار دسته کلی عوامل اقتصادی، اجتماعی، فیزیکی و

1 pandy et al
2 Arnell
3 Hong Wu and. Wilhite
4 Bachmair et al
5 Ma et al
6 Wilhite
7 Shahid & Behrawan, ، FAN et al

زیست‌محیطی تقسیم نمود (برنامه استراتژی‌های بین‌المللی برای کاهش بلایا (ISDR)[1]، ۲۰۰۷)، ازاین‌رو تنها درک و پیش‌بینی مخاطره مهم نیست، بلکه عواقب احتمالی مخاطره، که بستگی به آسیب‌پذیری‌های محیطی و اجتماعی دارد نیز اهمیت دارند. اکثر سیستم‌های هشدار دهنده خشکسالی پایش و یا پیش‌بینی مخاطره را ارائه می‌دهند، اما اطلاعاتی در خصوص وجود و یا عدم وجود پیامدهای منفی خشکسالی ارائه نمی‌دهند (بچمایر و همکاران، ۲۰۱۷). اساساً، دو مرحله مهم در محاسبه مخاطره خشکسالی وجود دارد. اولین راه شناسایی وقایع خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی است، سپس احتمال خشکسالی محاسبه می‌شود (یوآن[2]، ۲۰۱۳). برای بهبود مدیریت ریسک خشکسالی، شناسایی علل آسیب‌پذیری خشکسالی در یک منطقه خاص، گام مهمی است. پژوهش‌های مختلفی در ارتباط با تعیین ریسک خشکسالی چه در داخل ایران و چه در خارج از ایران انجام شده است. در عمده این مطالعات مخاطره خشکسالی براساس شاخص‌های خشکسالی و احتمال وقوع آن‌ها محاسبه شده است و برای محاسبه آسیب‌پذیری ریسک و یا حتی در بعضی موارد محاسبه ریسک، برخی از مطالعات از روش‌های سنجش از دور استفاده کرده‌اند (چوپرا، ۲۰۰٦، لین و چن، ۲۰۱۱، لوبیس و همکاران، ۲۰۱۷) و در برخی دیگر از مطالعات از روش‌های آماری استفاده شده است. این مطالعات معمول عوامل اقتصادی و اجتماعی را به‌عنوان عوامل آسیب‌پذیر ذکر می‌کنند (تاسکاریس[3]، ۲۰۰۷، پاندی و همکاران[4]، ۲۰۱۰، کیم و همکاران[5]، ۲۰۱۳، فن و همکاران[6]، ۲۰۱۷، پی و همکاران[7]، ۲۰۱۷، وو وهمکاران[8]، ۲۰۱۸، اپورو و همکاران[9]، ۲۰۱۹ و دای و همکاران[10]، ۲۰۲۰). در هر دو دسته از مطالعات فوق، برای بررسی میزان آسیب‌پذیری خشکسالی، استفاده از پرسش‌نامه و تکمیل آن توسط کشاورزان و مردم منطقه، انجام نشده‌است. در حالی که در این مطالعه، استفاده از پرسش‌نامه روش اصلی در محاسبه آسیب‌پذیری می‌باشد. محاسبه ریسک ابزاری مفید برای دید دقیق و مناسب از وضعیت خشکسالی در هر منطقه‌ای است. در واقع این دید، باعث کمک به مدیران برای اتخاذ تصمیم‌های بهتر برای سازگاری با خشکسالی در دوره‌های زمانی آتی می‌باشد. از این رو در این مطالعه سعی شده است برای پایش وضعیت ریسک خشکسالی زیر حوضه آبریز افین از داده‌های مشاهداتی و برای پیش‌بینی ریسک خشکسالی، از داده‌های ریزمقیاس شده اقلیمی حاصل از پروژه CORDEX[11] استفاده گردد. در انتها، با مدل‌سازی ریسک خشکسالی، میزان ریسک

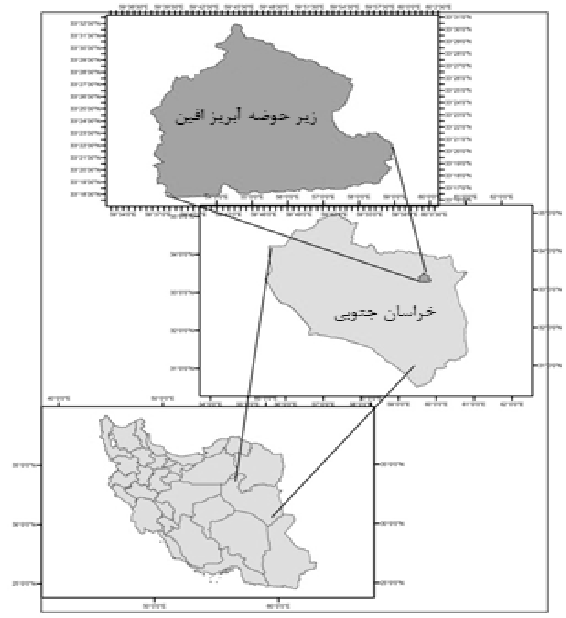
1 International Strategy for Disaster Reduction
2 Yuan
3 Tsakriris
4 Pandey et al
5 Kim et al
6 Fan et al
7 Pei et al
8 Wu et al
9 Apurv and Cai
10 Dai et al
11 Coordinated Regional climate Downscaling EXperiment

برای دوره‌های آتی محاسبه و با مقدار ریسک بدست آمده از داده‌های شبیه‌سازی شده اقلیمی مقایسه خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

زیرحوضه افین دارای وسعت ٦٥٥ کیلومترمربع و بخشی از حوضه پترگان- خواف می‌باشد که زیر مجموعه حوضه آبریز مرزی شرق ایران است. مساحت این حوضه ۳۲۹۸۰۰۰ هکتار است. این منطقه واقع در بین عرض‌های ۳۳ درجه و ٤۲ دقیقه شمالی تا ۳۳ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی و ۵۲ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی تا ۵۳ درجه و ۳۱ دقیقه شمالی می‌باشد. رودخانه دائمی در این زیر حوضه، رودخانه خوشبخت است. متوسط بارندگی در زیرحوضه افین حدود ١٥٦/٤ میلی‌متر و متوسط دمای منطقه، ١٤/٧ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (شکل ۱). اقلیم این زیرحوضه براساس اقلیم بندی دومارتن خشک و براساس اقلیم‌بندی آمبرژه خشک سرد می‌باشد. وجود اقلیم خشک و سرد زیرحوضه را مناسب برای کشت زرشک کرده‌است. اقتصاد روستای زیر حوضه افین از سالیان دور بر مبنای کشاورزی و محصول شاخص زرشک بوده است. بیش‌ترین زرشک تولیدی ایران در این منطقه به‌ثمر می‌رسد (سازمان جهاد کشاورزی شهرستان زیرکوه خراسان جنوبی،۱۳۹۷).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی زیرحوضه آبریز افین در کشور و استان خراسان جنوبی

۲-۲ روش مطالعه

این مطالعه با هدف بررسی و مدل‌سازی ریسک خشکسالی هواشناسی و هیدورلوژیکی و به صورت یک مطالعه موردی انجام شده است. برای محاسبه مخاطره ریسک خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک، در گام نخست از شاخص‌های خشکسالی SPEI و eRDI بعنوان شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و شاخص SRI بعنوان شاخص هیدرولوژیک استفاده شده است. دوره پایه برای این مطالعه از سال (۲۰۱۵-۱۹۸۳) می‌باشد. داده‌های مورد استفاده نیز شامل داده‌های ماهانه متوسط دمای حداکثر، متوسط دمای حداقل، متوسط دما در نزدیکی سطح زمین، بارش و داده‌های جریان رودخانه (رودخانه خوشبخت در زیرحوضه افین) می‌باشد. مقیاس‌های زمانی مورد استفاده، مقیاس فصلی زمستان (ژانویه- مارس)، بهار (آپریل- ژوئن) و پاییز (اکتبر- دسامبر)، مقیاس ۹ ماهه (۹ ماهه منتهی به ماه نوامبر، فصل زراعی داشت و برداشت محصول زرشک) و ۱۲ ماهه منتهی به سپتامبر (سالانه) می‌باشد.

از شاخص خشکسالی SPEI به دلیل بررسی تأثیر همزمان چند پارامتر دمایی و بارش، بعنوان پارامترهای مؤثر در خشکسالی، استفاده‌شد. برای محاسبه شاخص خشکسالی SPEI نیاز به داشتن مقدار تبخیر- تعرق می‌باشد برای این منظور از روش تبخیر- تعرق هارگریوز- سامانی برای محاسبه تبخیر تعرق پتانسیل استفاده‌شد (سامانی[1]، ۲۰۰۰).

تیگاس و همکاران[2] در سال ۲۰۱۷ شاخص خشکسالی eRDI را ارائه نمودند. در واقع این شاخص اصلاح‌شده‌ی شاخص RDI می‌باشد. در این روش بارش مؤثر در محاسبات شاخص استفاده می‌شود. جهت برآورد میزان بارش مؤثر در این تحقیق از روش تجربی USBR[3] استفاده شده است. این روش، مناسب برای مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد.

$$p_e = p \times \frac{125-0.2\times p}{125} \qquad p \le 250mm \qquad (۱)$$

$$p_e = 0.1 \times p + 125 \qquad p > 250 \qquad (۲)$$

در معادلات فوق، p_e بارش مؤثر مقیاس مورد نظر و p مقدار بارش متوسط سالانه در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

1 Samani
2 Tigkas et al
3 United States Bureau of Reclamation

جدول ۱- کلاس‌های متفاوت شاخص خشکسالی eRDI،SPEI و SRI

(SPEI: Vicent-serrano etal,2010, eRDI: Tigkas rtal,2017, SRI: Shukla & Wood,2008)

طبقات شاخص	توصیف وضعیت
بیشتر از ۲	ترسالی بسیار شدید
۱/۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
۱ تا ۱/٤۹	ترسالی متوسط
۰/۹۹ تا -۰/۹۹	نرمال
-۱ تا -۱/٤۹	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
کمتر از -۲	خشکسالی بسیار شدید

شاخص خشکسالی SRI (Standardized Runoff Index) همانند روش محاسبه شاخص خشکسالی SPI می‌باشد، با این تفاوت که در شاخص SRI از داده‌های جریان رودخانه‌ای استفاده می‌شود (Wood& Shukla, 2007)

۲-۲-۱ مخاطره خشکسالی

مخاطره خشکسالی به‌صورت احتمال وقوع خشکسالی در سطوح مختلف شدت خشکسالی تعریف شده است، برای محاسبه احتمال وقوع خشکسالی از رابطه ۳ استفاده شده است.

باتوجه به اینکه سه شاخص خشکسالی استفاده‌شده در این مطالعه، دارای توزیع نرمال و همچنین طبقه‌بندی این خشکسالی‌ها مطابق جدول شماره ۱ است، بنابراین با استفاده از جدول z نرمال، احتمال وقوع هر طبقه خشکسالی محاسبه شد. مقادیر احتمال برای هر یک از طبقات مطابق جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲- شدت خشکسالی، احتمال وقوع و وزن هر طبقه از خشکسالی برای شاخص‌های خشکسالی مورد بررسی

وضعیت	شدت هر طبقه	احتمال وقوع هر طبقه	وزن هر طبقه
خشکسالی خفیف	-۰/۹۹ تا ۰	۰/۳۱۵۹	۱
خشکسالی متوسط	-۱/٤۹ تا -۱	۰/۰۹۰٦	۲
خشکسالی شدید	-۱/۹۹ تا -۱/۵	۰/۰٤٤۵	۳
خشکسالی خیلی شدید	کمتر از -۲	۰/۰۲۲٦	٤

$$H = W \times P(x) class \times I \quad (۳)$$

در رابطه (۳) $P(x)class_i$ احتمال وقوع هر طبقه کلاس خشکسالی و $|I_i|$ شدت خشکسالی همان خشکسالی و W وزن طبقه مورد نظر می‌باشد.

۲-۲-۲ آسیب‌پذیری خشکسالی

آسیب‌پذیری مجموعه‌ای از شرایط اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است که حساسیت یک محیط به مخاطره را تعیین می‌کند (برنامه استراتژی‌های بین‌المللی برای کاهش بلایا (ISDR)[1]، ۲۰۰۷). برهمین اساس به‌منظور شناسایی میزان تأثیر هریک از عوامل آسیب‌پذیری، پرسش‌نامه‌ای متشکل از ۳۵ سؤال در سه بخش اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی طراحی شد. پرسش‌نامه در منطقه مورد مطالعه و به‌صورت تصادفی توسط کشاورزان تکمیل شد. تعداد نمونه لازم برای تکمیل پرسش‌نامه براساس روش‌های آماری و با استفاده از نرم افزار NCSS PASS، ٤٦ عضو تعیین شد (هینتز[2]، ۲۰۰۱).

پس از تکمیل پرسش‌نامه برای تعیین مقدار آسیب‌پذیری منطقه، از روش‌های تحلیل عاملی اکتشافی[3] و تحلیل عاملی تاییدی[4] استفاده‌شد. درجه آسیب‌پذیری، عددی بین صفر تا یک بدست خواهد آمد، هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، به‌معنی بیشتر بودن میزان درجه آسیب‌پذیری محیط از خشکسالی می‌باشد.

۲-۲-۳ ریسک خشکسالی

پس از محاسبه مخاطره خشکسالی و آسیب‌پذیری آن، باتوجه به تعریف ریسک، می‌توان مقدار ریسک خشکسالی را محاسبه نمود؛ بنابراین، ریسک به‌صورت کمی، طبق معادله (٤) بیان می‌شود:

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Vulnerability} \qquad (٤)$$

۲-۲-٤ داده‌های اقلیمی آینده

برای دستیابی به داده‌های هواشناسی مورد نیاز در دوره‌های آینده، با توجه به میزان دسترسی به داده‌های پروژه CORDEX (دسترسی به خروجی‌های مدل‌های اقلیمی پروژه CORDEX در سال ۱۳۹٦) و نیز براساس اینکه باید تمامی پارامترهای هواشناسی مورد نیاز، داده‌های تاریخی و RCP4.5 و RCP8.5 را داشته‌باشند، بنابراین تنها ۳ مدل (CNRM-CERFAC, GFDL- ESM2M و ICHEC-EC-EARTH) انتخاب شد (جدول ۳). علت انتخاب این دو سناریو، بررسی ریسک آینده در خوش‌بینانه‌ترین حالت و بدبینانه‌ترین وضعیت ممکن می‌باشد.

1 International Strategy for Disaster Reduction
2 Hintze
3 Exploratory Factor Analysis
4 Confirmatory Factor Analysis

دوره‌ی زمانی آینده در این تحقیق، سال‌های ۲۱۰۰–۲۰۲۰ می‌باشد که به سه دسته زمانی، آینده نزدیک (۲۰٤٦–۲۰۲۰)، آینده میانی (۲۰۷۳–۲۰٤۷) و آینده دور (۲۱۰۰–۲۰۷٤) تقسیم‌بندی شده است. دلیل این تقسیم‌بندی، به‌منظور مقایسه‌ی مناسب تغییرات میزان ریسک خشکسالی، میان دوره پایه (سال‌های ۲۰۱۵–۱۹۸۹) و دوره‌های زمانی آتی، می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات مدل‌های اقلیمی استفاده شده در این مطالعه

تفکیک (رزولوشن) افقی	نام مدل	شناسه موسسه	کشور	مرکز مدلسازی (یا گروه مدلسازی)
۰/٤٤ * ۰/٤٤	CNRM-CM5	CNRM-CERFACS	France	Modèle du Centre National de Recherches Météorologiques - Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
۰/٤٤ * ۰/٤٤	GFDL-ESM2M	NOAA GFDL	USA	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
۰/٤٤ * ۰/٤٤	EC-EARTH	EC-EARTH	Ireland	EC-EARTH consortium

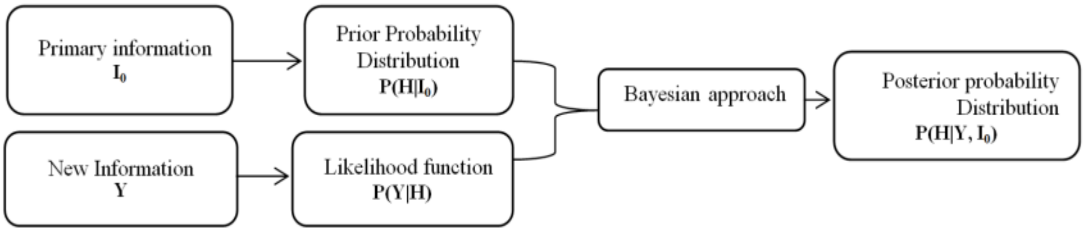
پس از استخراج داده‌ها، ضریب همبستگی، ضریب تبیین و ضریب نتش- ساتکلیف (مک کویین[1]، ۲۰۰٦) به منظور بررسی توانایی مدل‌ها در شبیه‌سازی برای آینده، محاسبه شد. در مطالعات تغییر آب و هوا، منابع مختلفی از عدم قطعیت وجود دارد که بر نتایج نهایی تأثیر می‌گذارد. یکی از منابع عدم قطعیت، خطای مدل‌هاست است. به‌منظور از بین بردن این عدم قطعیت، یکی از روش‌ها، ترکیب کردن مدل‌های اقلیمی است. از روش‌های رایج برای این منظور، روش وزن‌دهی میانگین‌های مشاهداتی دما و بارش در قالب رویکرد بیزین می‌باشد (معادله ٤-۱ و ٤-۲) (لئو و همکاران[2]، ۲۰۰۷، هاشمی-آنا و همکاران[3]، ۲۰۱۵). طرحواره این روش برگرفته از مطالعه هاشمی –آنا و همکاران در شکل شماره ۲ مشاهده می‌شود.

$$W_i = \frac{\frac{i}{\Delta p_i}}{\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{\Delta p_i}} \quad (٤-۱)$$

$$W_i = \frac{\frac{i}{\Delta T_i}}{\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{\Delta T_i}} \quad (٤-۲)$$

1 McCuen et al
2 Luo et al
3 Hashemi-Ana et al

در معادلات فوق، p معرف بارش و T معرف دما می‌باشد. Δp_i اختلاف میانگین بارش شبیه‌سازی شده در دوره آینده از میانگین بارش مشاهداتی مقیاس‌های زمانی دوره پایه است (i). N نیز تعداد مدل‌ها می-باشد.



شکل ۲- طرحواره گام‌های روش بیزین برای آنالیز عدم قطعیت در این تحقیق (هاشمی- انا و اهمکاران)

۲-۲-۵ شبیه‌سازی رواناب دوره‌های آتی

برای دستیابی به داده‌های رواناب دوره‌های آتی از مدل IHACRES استفاده شده است. این مدل، یک مدل پارامتری بارش- رواناب است که در بیشتر مناطق آب و هوایی کاربرد دارد. باتوجه به داده‌های ورودی اندک و نیز صرف زمان کم، به آسانی در بسیاری از حوضه‌های آبخیز، این مدل به کار برده می‌شود (لیتوود و همکاران[1]، ۱۹۹۷). به‌منظور بررسی صحت‌سنجی نتایج از ضریب همبستگی و آزمون پارامتری T.student استفاده شد.

۲-۲-٦ پیش‌بینی و مدل‌سازی ریسک خشکسالی

به‌منظور پیش‌بینی ریسک خشکسالی از دو روش استفاده شد. در روش نخست (روش مستقیم)، همانند دوره پایه، برای دوره‌های آتی، مقادیر خشکسالی، مقدار مخاطره و در انتها ریسک خشکسالی محاسبه می‌شود. در روش دوم، با کمک دو روش آماری، مدل‌سازی ریسک خشکسالی براساس ریسک خشکسالی دوره پایه، انجامش و سپس به کمک مدل‌های بدست آمده، ریسک خشکسالی برای سال‌های آتی، پیش‌بینی شد.

در مدل‌سازی ریسک خشکسالی باتوجه به اینکه مقدار درجه آسیب‌پذیری بدست آمده از پرسش‌نامه، در طی زمان‌های مختلف ثابت در نظر گرفته شده است؛ از این‌رو مدل‌سازی مخاطره انجام شده است.

باتوجه به‌اینکه مخاطره خشکسالی براساس شاخص‌های خشکسالی بدست می‌آید و هر شاخص خشکسالی، خود متأثر از پارامترهای هواشناسی می‌باشد؛ از این‌رو، با کمک روش‌های آماری مدل‌سازی،

1 Littlewood et al

ابتدا پارامترهای مؤثر در هر مخاطره خشکسالی (هواشناسی وهیدرولوژیک) شناسایی و سپس مـدل مناسـب برای پیش‌بینی بدست آمد. پس از پیش‌بینی مخاطره، با ضرب کردن مقدار آسیب‌پذیری کـه در قسـمت قبـل توضیح داده‌شد، مقدار ریسک خشکسالی برای سال‌های آتی محاسبه می‌شود. به منظور مـدل‌سـازی ریسـک خشکسالی از دو روش مدل‌سـازی Bootstraped Quantile Regression (بـا تکـرار ۵۰۰) ، loess Nonparametric Regression استفاده شد.

Bootstraped Quantile Regression: مدل‌های رگرسیون معمولی، برای میانگین شرطی برازش داده می‌شـود، اما رگرسیون چندکی، برای چندک‌های شرطی بکار می‌رود. مهم‌ترین کـاربرد رگرسـیون چنـدکی، شناسـایی شکل توزیع متغیر وابسته‌ی مدل در سطوح گوناگون می‌باشد. ویژگـی دیگـر ایـن روش مـدل‌سـازی، بـوت استرپ کردن است. در واقع با این روش، تعداد نمونه‌ها را افزایش داده تا از این طرق بـا ایجـاد نمونـه‌هـای فراوان، شرایط نمونه را به شرایط جامعه نزدیک کرده و با در نظر گـرفتن تمـامی حالـات تشـکیل نمونـه، از صحت برآورد ضرائب و برآورد فاصله اطمینان برای ضرایب، اطمینان بیشتری پیدا کرد (افرون[۱]، ۲۰۰۰).

چندک‌های مورد بررسی در این مطالعه، چندک‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۹۹ می‌باشد.

Loess Nonparametric Regression: Loess یک مدل تعمیم یافته و متداول از رگرسیون محلی یـا رگرسـیون چند جمله‌ای است که به رگرسیون میانگین متحرک نیـز مشـهور اسـت.LOESS یـک روش رگرسـیون غیـر پارامتری است. در رگرسیون پارامتری، شکل مشخصی برای پارامترهـای مـدل، در نظـر گرفتـه مـی‌شـود در حالی که در رگرسیون ناپارمتری شکل مشخصی برای پارامترهای مـدل در نظـر گرفتـه نمـی‌شـود. در روش ناپارمتری، داده‌ها خود از میان مدل‌ها، بهترین مدل را برمی‌گزینند و این حالت باعث افـزایش کـارایی روش رگرسیون ناپارمتری نسبت به رگرسیون پارامتری می‌شود.

از میان مدل‌های بدست آمده از چهار چندک استفاده شده (q=25, 50, 75, 99) در این تحقیق، چندکی کـه مدل مناسب‌تری براساس ضریب توافق ویلموت ((RMSE، d و MAD را داشته‌است، انتخاب گردید.

برای تعیین توانایی و مناسب بودن مدل‌ها از آماره‌های ذیل استفاده شده است.

1 Efron

mathematical equation	Numerical statistics
$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(p_i - o_i)}{\sum_{i=1}^{N}(\lvert p_i - \bar{o}\rvert + (\lvert o_i - \bar{o}\rvert)^2}$	Villmott's Index of Agreement (d)
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(p_i - o_i)}{N}}$	RMSE
$MSEP = \frac{\sum_{i=1}^{N}(p_i - o_i)}{N}$	MSEP
$MAD = \frac{(\left\lvert (p_i - o_i) - \frac{\sum_{i=1}^{N}(p_i - o_i)}{N}\right\rvert}{N}$	MAD
$MARE = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{N}(p_i - o_i)}{\frac{\sum_{i=1}^{N}(p_i - o_i)}{N}}}{N}$	MARE

در تمامی روابط فوق p_i مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها و o_i مقادیر مشاهده شده می‌باشند. N نیز تعداد نمونه می‌باشد.

براساس این روابط ریاضی، توانایی و مناسب بودن مدل‌ها مشخص می‌شود. براساس آماره‌های عددی MAD، MARE ، RMSE و MSEP بهترین وضعیت، مقدار صفر (۰) و بدترین ∞ است. براساس شاخص توافق ویلموت، مقدار یک (۱) بهترین وضعیت مقدار ۰ بدترین وضعیت است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج بررسی توانایی مدل‌های اقلیمی مورد بررسی و توسعه یک مدل ترکیبی

برای بررسی توانایی پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی استفاده شده، از ضریب همبستگی (R)، ضریب تبین (R2) و ضریب نتش- ساتکلیف (NS) استفاده‌شد. نتایج این ضرایب حاکی از توانایی کامل مدل‌های دمایی (دمای حداقل، دمای حداکثر و متوسط دما در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین) می‌باشد؛ اما هر سه مدل بارش استفاده شده در این مطالعه، نیازمند تصحیح می‌باشند، از این‌رو با استفاده از روش تغییر فاکتور، سعی در تصحیح مقادیر بارش برای هر سه مدل شد. پس از تصحیح، سپس با استفاده از روش میانگین وزنی با رویکرد بیزین، مدل ترکیبی برای بارش و پارامترهای دمایی مشخص گردید. در واقع براساس این روش، وزن هر یک از مدل‌ها تعیین و با استفاده از میانگین وزنی و بر اساس هر سه مدل، مقدار نهایی پارامتر مورد نظر محاسبه می‌شود. براساس نتایج این بخش، برای داده‌های بارش، باتوجه به سناریوی RCP4.5 مدل ICHEC-EARTH بیش‌ترین ضریب را در مدل ترکیبی داشته است، براساس سناریو RCP8.5 مدل مناسب، در سه دوره آتی متفاوت است، اما به‌صورت کلی می‌توان گفت در آینده نزدیک مدل CNRM، در آینده میانی هر دو مدل CNRM و ICHEC-EARTH به صورت یکسان در مدل تأثیر داشته‌اند و در آینده

دور مدل ICHEC-EARTH دارای بیش‌ترین تأثیر می‌باشد. برای هر سه پارامتر دمایی، و براساس هر دو سناریوی انتشار خوش‌بینانه و بدبینانه، مدل GFDL-ESM2M بیش‌ترین وزن را در مدل ترکیبی داشته است.

۳-۲- نتایج مدل IHACRES

نتایج این بخش نشان داد که براساس دو سناریوی انتشار، مقدار رواناب در سال‌های آتی تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت. افزایش دما و بدنبال آن، افزایش احتمال وقوع بارش‌های حدی در منطقه مورد مطالعه شاید دلیلی برای تغییرات کم در مقدار رواناب در سال‌های آتی باشد، که افزایش دما در سال‌های آینده براساس خروجی مدل‌های CORDEX استفاده شده در این تحقیق، تأیید می‌شود. از دیگر دلایل احتمالی عدم کاهش رواناب، می‌توان به افزایش ذوب برف زیر حوضه‌های مجاور در اثر افزایش دما دانست که به صورت جریان‌های زیر سطحی و یا سطحی وارد منطقه می‌شوند.

جدول ٤- متوسط مقادیر رواناب، بارش سالانه، دمای حداقل، دمای حداکثر و دما در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در دوره پایه و دوره‌های آتی برمبنای RCP4.5 و RCP8.5

پارامتر	دوره پایه	RCP	آینده نزدیک	آینده میانی	آینده دور
رواناب (m3/s)	۰/۰۷	RCP4.5	۰/۰۷	۰/۰٦	۰/۰٦
		RCP8.5	۰/۰۷	۰/۰۷۱	۰/۰٦
بارش سالانه (mm)	۱۳/٤	RCP4.5	۱۳/۹۳	۱۲/۷٦	۱۲/۸۳
		RCP8.5	۱۳/٤۹	۱۳/۹٤	۱۲/۸۸
دمای حداقل (C°)	۷/۵	RCP4.5	۸/۷۲	۹/٤۷	۹/۷۹
		RCP8.5	۸/۹٦	۱۰/۲۵	۱۱/۸٤
دمای حداکثر (C°)	۲۲	RCP4.5	۲۳/۰٤	۲٤/۰۷	۲٤/٤۸
		RCP8.5	۲۳/۵۸	۲۵/۰۲	۲٦/۷۱
دما در ارتفاع ۲ متری سطح زمین (C°)	۱٤/۷	RCP4.5	۱۵/۸٤	۱٦/۷٤	۱۷/۱۰
		RCP8.5	۱٦/۲٤	۱۷/٦۱	۱۹/۲۸

۳-۳- آسیب‌پذیری خشکسالی

درجه آسیب‌پذیری براساس پرسش‌نامه، مقدار ۰/۵۳ برای زیرحوضه آبریز افین بدست آمد. در واقع، این عدد نشان می‌دهد که در حدود نیمی از آسیب‌پذیری زیرحوضه به دلیل عوامل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی این زیرحوضه می‌باشد. این درجه از آسیب‌پذیری در واقع میانگینی از حساسیت سه عامل

می‌باشد. به صورت مجزا درجه آسیب‌پذیری برای هریک از عوامل اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی به ترتیب عبارتند از ۰/۳۰، ۰/۳٤ و صفر. براین اساس، عامل زیست‌محیطی سهم بیشتری در آسیب‌پذیری زیرحوضه افین را دارا می‌باشد. در مقابل عامل اجتماعی تاثیری در آسیب‌پذیری منطقه ندارد. آسیب پذیری برای دوره پایه ۰/۵۳ و برای دوره آتی، بازه ۰/۳٦ تا ۰/۷۰ در نظر گرفته شد.

$(\text{Vulanability} \pm \text{standard deviation})$

۳-٤- ریسک خشکسالی براساس دو روش مستقیم و استفاده از مدل‌های پیش‌بینی

نتایج این بخش نشان می‌دهد که براساس شاخص خشکسالی eRDI در دوره‌های آتی شدت وقایع ریسک خشکسالی نسبت به دوره پایه نسبتاً بیشتر می‌شود، بدین ترتیب که تعداد و شدت وقایع خشکسالی (شامل چهار وضعیت خشکسالی خیلی شدید، شدید، متوسط و خفیف) در دوره آینده دور نسبت به دو دوره آینده میانی و نزدیک براساس سناریوهای انتشار بدبینانه و خوش‌بیبنانه بیشتر می‌شود. همچنین نتایج وقوع خشکسالی‌ها و شدت‌های آن‌ها در دوره‌های آتی نشان داد که شدت خشکسالی‌ها متأثر از سناریوی انتشار نیز می‌باشد، بدین ترتیب که با افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، شدت و یا حتی تعداد وقایع خشکسالی‌ها افزایش می‌یابد که این مطلب در نتایج بدست آمده از شاخص خشکسالی SPEI و eRDI کامل نمایان است، چرا که در این شاخص علاوه بر بارش، پارامترهای دمایی نیز دخیل هستند. با افزایش گازهای گلخانه‌ای حبس شدن گرمای (مادون قرمز) منعکس شده از سطح زمین افزایش و درنتیجه باعث بالارفتن دماهای سطحی خواهد شد.

نتایج ریسک خشکسالی نشان می‌دهد که در فصل زمستان بیشترین تغییرات تعداد دفعات خشکسالی نسبت به دوره پایه حادث خواهد شد. براساس شاخص SRI نیز ریسک‌های خیلی شدید ناشی از خشکسالی‌های خیلی شدید در هیچ یک از مقیاس‌های زمانی مورد بررسی در سه دوره آتی براساس هردو سناریوی انتشار، مشاهده نشد. همچنین مشخص شد که در دوره آینده نزدیک، فراوانی وقوع ریسک خشکسالی‌های شدید و متوسط نسبت به دوره پایه و دو دوره زمانی آینده میانی و دور بیشتر خواهد بود.

باتوجه به شاخص SPEI و eRDI که چهار پارامتر متوسط دما، متوسط دمای حداقل، متوسط دمای حداکثر و بارش برای محاسبه‌ی مقدار آن لازم می‌باشد، براساس روش‌های مدل‌سازی و انتخاب بهترین مدل، پارامترهای مؤثر در برآورد مخاطره خشکسالی در هریک از مقیاس‌های زمانی مورد مطالعه، مشخص و پیش‌بینی میزان مخاطره و پس از آن، محاسبه ریسک صورت پذیرفت.

به‌منظور صحت سنجی مدل‌ها، ۱۰ سال آخر دوره پایه برای این منظور استفاده شد. بدین ترتیب کـه ۲۳ سال نخست (۲۰۰۵–۱۹۸۳) برای انتخاب مدل و ۱۰ سال پـس از آن (۲۰۱۵–۲۰۰۶) بـرای صـحت سـنجی مدل‌ها استفاده شد.

باتوجه به نتایج بدست آمده، همراستایی قوی بین مقادیر مخاطره حاصل از مدل‌های پیش‌بینـی و مقـادیر مخاطره مشاهده شده، براساس سه شاخص خشکسالی مورد مطالعه و براساس هر دو سناریو دیده می‌شود.

براساس روش BQR و با توجه به آماره‌های شاخص توافق ویلموت ((RMSE، d و MAD ، مناسب‌تـرین مدل در میان چهار مدل (q=25,50,75 ,99)، مدل با چنـدک ۵۰ (چـارک میانـه) در بیشـتر مقیـاس‌هـا و در دو شاخص خشکسالی هواشناسی، وبرای شاخص خشکسالی هیدرولوژیک، مـدل چنـدک ۹۹، تعیـین شـد (در جداول ۵، ٦ و ۷ چارک مناسب تعیین شده برای هر مقیاس به تفکیک شاخص‌ها ذکر شـده اسـت). در ایـن قسمت نیز ابتدا پارامترهای مؤثر بر شاخص‌هـای SPEI و eRDI مشـخص و سـپس مـدل‌سـازی انجـام شـد. براساس شاخص SPEI، در ٤ چندک، بارش، پارامتر مؤثر شناخته شد. تنها در مقیاس زمانی ۹ ماهه، متوسـط دمای حداقل و متوسط دما در نزدیکی سطح زمین موثربـوده اسـت. بـا توجـه بـه شـاخص eRDI در فصـل زمستان علاوه بر بارش، متوسط دمای حداکثر، متوسط دمای حداقل و متوسط دمـا در نزدیکـی سـطح زمـین مؤثر بوده است. در سایر مقیاس‌ها، بارش، پارامتر مؤثر برای پیش‌بینی می‌باشد.

براساس روش رگرسیون ناپارمتری Loess، در دو شاخص خشکسـالی SPEI و eRDI بـا توجـه بـه اینکـه چهار متغیره می‌باشد، به‌منظور شناسایی پارامتر مؤثر در مدل، نخسـت از روش رگرسـیون ناپـارامتری سـاده بوت استرپ شده (با تکرار ۵۰۰)، پارامتر مؤثر شناسایی و سپس مدل Loess برای پـارامتر مـؤثر اجـرا شـد. در تمامی پنج مقیاس زمانی براساس دو شاخص خشکسالی SPEI و eRDI، پارامتر بارش، تنهـا پـارامتر مـؤثر شناخته شد. به منظور انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی براساس دو روش مذکور، از آمـاره‌هـای عـددی تعیـین به‌منظور تعیین توانایی و مناسب بودن مدل‌ها استفاده شـد. نتـایج ایـن بخـش در جـداول ۵، ٦ و ۷ گـزارش شده است. همانطور کـه از جـداول مشـخص اسـت، در بیشـتر مقیـاس‌هـای زمـانی و بـرای سـه شـاخص خشکسالی SPEI ، eRDI و SRI، مدل رگرسیون ناپارامتری Loees بیش‌ترین توانایی را در پـیش‌بینـی مخـاطره داشته است.

براساس نتایج این بخش نیز می‌توان گفت که روش رگرسیون ناپارامتری Loess در شـاخص SRI اگرچـه در بیشتر مقیاس‌ها بعنوان مدل مناسب شناسایی نشده است، اما مقدار برآورد میزان مخاطره بـرای سـال‌هـای آتی را مانند روش مستقیم، با دامنه بیشتری از تغییرات نشان می‌دهد.

جدول ۵- شاخص توافق ویلموت (d)، MARE، MAD، MSEP و RMSE برای مدل‌های ریسک شاخص SPEI

گام زمانی	مدل	RMSE	MSEP	MAD	MARE	d
زمستان	LOESS	0.04	0	0.03	0.33	0.94
	BQR(q=50)	0.08	0.01	0.06	0.61	0.72
پاییز	LOESS	0.07	0.01	0.04	1.07	0.78
	BQR(q=50)	0.06	0	0.05	1.29	0.85
بهار	LOESS	0.04	0	0.03	0.43	0.95
	BQR(q=50)	0.08	0.01	0.07	1.24	0.74
۹ماه منتهی به فصل برداشت زرشک	LOESS	0.09	0.01	0.09	2.08	0.52
	BQR(q=99)	0.12	0.01	0.1	2.38	0.62
سالانه	LOESS	0.03	0	0.03	0.34	0.96
	BQR(q=25)	0.2	0	0.04	0.48	0.89

۳-۵- نتایج مقایسه میان مقادیر ریسک خشکسالی پیش‌بینی شده توسط مدل‌های پیش‌بینی با ریسک خشکسالی از روش مستقیم در سال‌های آتی

در این بخش به مقایسه میان نتایج ریسک خشکسالی محاسبه شده به روش مستقیم با ریسک خشکسالی‌های پیش‌بینی شده توسط روش‌های مدل‌سازی پرداخته شده است. برای این منظور از مقدار p-value آزمون T.student و ضریب همبستگی استفاده شده است. (جداول ۸ و ۹)

باتوجه به نتایجی که در جداول ۸ و ۹ ارائه شده است، می‌توان دریافت که در محاسبه ریسک خشکسالی برای سال‌های آتی براساس روش مستقیم و روش مدلسازی با استفاده از مدل مناسب، همراستایی قوی مشاهده می‌شود (باتوجه به بالا بودن مقادیر ضریب همبستگی). براساس دو سناریوی انتشار خوش‌بینانه و بدبینانه، در مقیاس زمانی سالانه و فصل بهار، مقدار کمتر همراستایی مشاهده می‌شود. براساس نتایج آزمون T-student نیز می‌توان گفت که اختلاف معنی‌داری در مقدار برآورد ریسک خشکسالی براساس هر دو روش، وجود ندارد، تنها در شاخص eRDI در مقیاس‌های زمانی بهار و ۹ ماهه منتهی به فصل برداشت زرشک براساس دو سناریوی انتشار و مقیاس سالانه شاخص eRDI ، اختلاف معنی‌دار مشاهده می‌شود که دلیل این امر می‌تواند به دلیل پراکندگی بیشتر بارش در این مقیاس‌ها و توام شدن آن با تغییرات دمایی باشد، در حالی که در مدل‌های انتخابی برای این مقیاس‌ها تنها پارامتر بارش،

بعنوان متغیر مؤثر شناسایی شده است اما با توجه به همراستایی‌های بالا در این مقیاس‌ها، می‌توان گفت که مدل‌ها با اعمال اصلاحاتی مناسب هستند.

جدول ٦- شاخص توافق ویلموت (d)، MARE، MAD، MSEP و RMSE برای مدل‌های ریسک شاخص eRDI

d	MARE	MAD	MSEP	RMSE	مدل	گام زمانی
0.72	0.51	0.05	0.01	0.08	LOESS	زمستان
0.55	0.87	0.09	0.01	0.11	BQR(q=75)	
0.72	0.69	0.03	0.01	0.08	LOESS	پاییز
0.83	1.44	0.06	0	0.07	BQR(q=50)	
0.93	0.51	0.03	0	0.05	LOESS	بهار
0.72	1.29	0.08	0.01	0.09	BQR(q=50)	
0.96	0.24	0.02	0	0.03	LOESS	۹ماه منتهی به فصل برداشت زرشک
0.92	0.44	0.03	0	0.04	BQR(q=50)	
0.60	0.63	0.05	0.01	0.09	LOESS	سالانه
0.62	0.70	0.06	0.01	0.08	BQR(q=50)	

جدول ٧- شاخص توافق ویلموت (d)، MARE، MAD، MSEP و RMSE برای مدل‌های ریسک شاخص SRI

d	MARE	MAD	MSEP	RMSE	مدل	گام زمانی
0.17	1.09	0.18	0.04	0.2	LOESS	زمستان
0.41	0.66	0.11	0.02	0.12	BQR(q=99)	
0.99	0.04	0.01	0	0.01	LOESS	پاییز
0.49	0.6	0.1	0.01	0.11	BQR(q=99)	
0.51	0.68	0.12	0.03	0.18	LOESS	بهار
0.88	0.33	0.06	0.01	0.08	BQR(q=99)	
0.40	0.92	0.15	0.03	0.19	LOESS	۹ماه منتهی به فصل برداشت زرشک
0.67	0.40	0.06	0.01	0.07	BQR(q=99)	
0.45	0.73	0.11	0.02	0.15	LOESS	سالانه
0.67	0.44	0.07	0.01	0.08	BQR(q=99)	

جدول ٨- P مقدار آزمون T-student و ضریب همبستگی (R) میان مقادیر ریسک خشکسالی آینده برمبنای روش مستقیم و مدل مناسب سه شاخص خشکسالی SPEI، eRDI و SRI براساس RCP4.5

SRI		eRDI			SPEI	گام زمانی
مدل مناسب	R	مدل مناسب	R	مدل مناسب	R	
	p-value		p-value		p-value	
BQR	0.56	Loess	0.71	Loess	0.92	زمستان
	0		0.003		0	
Loess	0.90	BQR	0.81	Loess	0.74	پاییز
	0		0		0	
BQR	0.49	Loess	0.83	Loess	0.86	بهار
	0		0.2		0.02	
BQR	0.75	Loess	0.76	BQR	0.95	۹ماه منتهی به فصل برداشت زرشک
	0		0.16		0	
BQR	0.72	BQR	0.48	Loess	0.69	سالانه
	0		0.03		0.66	

جدول ۹- P مقدار آزمون T-student و ضریب همبستگی (R) میان مقادیر ریسک خشکسالی آینده برمبنای روش مستقیم و مدل مناسب سه شاخص خشکسالی SPEI، eRDI و SRI براساس RCP8.5

گام زمانی	SPEI			eRDI			SRI		
	R	p-value	مدل مناسب	R	p-value	مدل مناسب	R	p-value	مدل مناسب
زمستان	0.91	0	Loess	0.75	0.005	Loess	0.73	0	BQR
پاییز	0.74	0	Loess	0.47	0.05	BQR	0.94	0	Loess
بهار	0.94	0.01	Loess	0.88	0.24	Loess	0.78	0	BQR
۹ماه منتهی به فصل برداشت زرشک	0.35	0	BQR	0.75	0.62	Loess	0.76	0	BQR
سالانه	0.68	0.17	Loess	0.36	0.004	BQR	0.74	0	BQR

٤- نتیجه‌گیری

این مطالعه، با هدف شناسایی ریسک خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک و توسعه مدلی برای پیش‌بینی آن به‌منظور پیشگیری از بروز خسارات شدید و جدی به‌صورت موردی در زیر حوضه آبریز افین انجام شد. برای این‌منظور نخست از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک بعنوان ابزاری برای اندازه‌گیری شدت خشکسالی‌ها و به دنبال آن محاسبه میزان مخاطره ریسک خشکسالی‌های استفاده شد. آسیب‌پذیری نیز با کمک پرسش‌نامه از کشاورزان منطقه تهیه و در انتها میزان ریسک خشکسالی برای دوره زمانی پایه محاسبه گردید. برای پیش‌نگری میزان ریسک خشکسالی برای دوره‌های زمانی آتی، نیاز به داده‌های اقلیمی و هواشناسی دوره‌های زمانی آتی بود که از این‌رو از مقادیر خروجی پروژه اقلیمی CORDEX و نیز مدل بارش- رواناب IHACRES استفاده شد. نتایج بررسی سه مدل اقلیمی صحت و درستی سه پارامتر دمایی را تأیید نمود ولیکن پارامتر بارش نیز با توجه به اقلیم نیمه‌خشک و پراکندگی بارش در منطقه افین، پس از اعمال تصحیحات، قابل استفاده گردید. در پیش‌نگری‌ها از مقادیر رواناب حاصله از مدل IHACRES استفاده شد، چراکه در مقایسه میان پارامتر رواناب براساس خروجی مدل‌های اقلیمی CORDEX و مدل بارش- رواناب IHACRES، نتایج بدست آمده از روش IHACRES دقت بالاتری را نشان داد. رزاقیان و همکاران (۱۳۹۵) و پور محمدی و همکاران (۱۳۹٦) کاهش رواناب را برای سال‌های آتی با استفاده از دو روش مدل‌سازی IHACRES و الگوریتم احتساب خاک پیش‌بینی نموده‌اند، در حالی که لکزائیان‌پور و همکاران (۱۳۹۵) و بینش و همکاران (۱۳۹۷)، افزایش میزان رواناب را برای

سال‌های آتی پیش‌بینی نموده‌اند؛ اما در تحقیق حاضر، نتایج پیش‌نگری مقدار جریان سطحی براساس مدل هیدرولوژیکی IHACRES حاکی از عدم وجود تغییر قابل ملاحظه‌ای براساس دو سناریوی انتشار در مقدار رواناب برای سال‌های آتی است.

با توجه به هدف اصلی این تحقیق، سعی در توسعه مدلی برای پیش‌بینی میزان ریسک خشکسالی برای سال‌های آتی شد. براین اساس و به منظور افزایش دقت در پیش‌بینی میزان ریسک خشکسالی‌ها، از دو روش مدل‌سازی استفاده شد. به‌منظور صحت‌سنجی هر یک از روش‌های مورد استفاده، برآورد مخاطره برای ده سال اخیر (۲۰۱۵–۲۰۰٦) انجام شد. نتایج بخش صحت‌سنجی مدل‌ها، نشان داد که رگرسیون ناپارامتری LOESS در بیشتر مقیاس‌های زمانی دو شاخص خشکسالی هواشناسی دقت بیشتری داشته‌است. پس از این مدل، مدل رگرسیون نیمه پارامتری چندکی بوت استرپ شده، مناسب تشخیص داده شد. برای پارامتر رواناب، روش مدل‌سازی رگرسیون نیمه پارامتری بوت استرپ شده با چندک ۹۹ در بیشتر مقیاس‌های زمانی با دقت بالاتری توانسته است، برآورد میزان مخاطره را داشته باشد. بر اساس نتایج این بخش می‌توان گفت که روش‌های مدل‌سازی امکان برآورد و پیش‌نگری میزان ریسک خشکسالی‌ها را دارند، تنها بسته به انتخاب روش مدل‌سازی مناسب، می‌توان دقت پیش‌گری‌ها را افزایش داد. در پیش-نگری مقادیر مخاطره برای دوره‌های زمانی آتی با استفاده از مدل مناسب انتخاب شده در هر مقیاس زمانی و براساس هر شاخص خشکسالی، با مقادیر مخاطره دوره آتی که به روش مستقیم بدست آمد، همراستایی قوی مشاهده شد، اما اختلاف میانگین میان این دو مقدار معنادار شده است. باتوجه به اینکه مقادیر مخاطره روش مستقیم خود براساس پیش‌نگری متغیرهای هواشناسی هستند و نتایج مدل‌ها نیز براساس پیش‌نگری-های متغیرهای هواشناسی و عدم قطعیت‌های ناشی از انتخاب مدل هستند، شاید دلیلی بر معنی‌دار شدن میانگین‌ها باشد. دوره آماری طولانی مورد مقایسه (دوره ۸۱ ساله) می‌تواند عامل دیگر ایجاد این اختلاف‌ها باشد. دلیل اهمیت دقت در انتخاب مدل‌های مناسب برای پیش‌نگری ریسک به دو دلیل است، نخست اینکه خشکسالی به‌تنهایی نمی‌تواند یک خطر و فاجعه محسوب شود، اما آسیب‌پذیری و تأثیرات خشکسالی بر محیط است که این پدیده را تبدیل به یک خطر می‌کند، دوم؛ اگرچه نمی‌توان مانع از وقوع حوادث طبیعی چون خشکسالی شد اما می‌توان با داشتن آگاهی از وضعیت ریسک خشکسالی برای سال‌های آتی، تمهیدات لازم برای سازگاری با این پدیده را به‌منظور به حداقل رساندن اثرات منفی واقعه خشکسالی فراهم ساخت.

کتابنامه

بینش، ن؛ نیک‌سخن، م.ح؛ سارنگ، امین؛ ۱۳۹۷. مطالعه رژیم بارش و دبی حداکثر رواناب شهری در شرایط اقلیمی آینده (مطالعه موردی: حوضه سیل‌برگردان غرب). نشریه مهندسی عمران امیرکبیر.۸۱۵،۵۰-۸۲۶.

پورمحمدی، س؛ دستورانی، م.ت؛ مساح بوانی، ع.ر؛ گودرزی، م؛ جعفری، ه؛ رحیمیان، م.ح؛ ۱۳۹٦. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه و ارائه راهکارهای سازگاری با اثرات آن (مطالعه موردی: حوزه آبریز تویسرکان همدان). آبخیزداری ایران، ۳۷، ۱-۱۳.

خلیلی، ن؛ رضایی پژند، ح؛ درخشان، ه؛ داوری، ک؛ ۱۳۹٦. توسعه چارچوبی برای ارزیابی ریسک خشکسالی کشاورزی بر گندم دیم. تحقیقات منابع آب ایران، ١٤, ٥٩-٧٠.

رزاقیان، هادی؛ شاهدی، ک؛ حبیب‌نژادروشن، م؛ ۱۳۹۵. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوزه آبخیز بابلرود با استفاده از مدلIHACRES . نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۷، ۱۵۹-۱۷۲.

لکزییان‌پور، غ. ح. محمدرضاپور، ا؛ مالمیر، م؛ ۱۳۹۵. ارزیابی آثار تغییراقلیم بر میزان رواناب رودخانه نازلوچای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. نشریه جغرافیا و توسعه، ٤۲، ۱۸۳-۱۹۸.

مساعدی، ا؛ کواکبی، غ؛ عبدالله‌زاده، س آشکارسازی تغییرات اقلیمی براساس آزمون آماری من-ویتنی در شهر مشهد. نخستین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی، ۲۰۱۱.

نوقابی، ج؛ هادی نوقابی؛ ۱۳۸۷. نکاتی چند در مورد برآورد حجم نمونه و معرفی نرم افزار مربوطه. نشریه دانشجویی آمار (ندا)، ٤، ۱۳-۲۱.

ANDERSON-COOK, C. M. & PREWITT, K., 2005. Some guidelines for using nonparametric methods for modeling data from response surface designs. *Journal of Modern Applied Statistical Methods,* 4**,** 12.

Apurv, T. and X. Cai., 2019, "Evaluation of the Stationarity Assumption for Meteorological Drought Risk Estimation at the Multidecadal Scale in Contiguous United States." Water Resources Research 55(6): 5074-5101.

ARNELL, N. W., 1999. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global environmental change,* 9**,** 5-23.

BACHMAIR, S., SVENSSON, C., PROSDOCIMI, I., HANNAFORD, J. & STAHL, K. 2017. Developing drought impact functions for drought risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences,* 17**,** 1947-1960.

CHOPRA, P. Drought risk assessment using remote sensing and GIS: a case study of Gujarat. 2006. ITC.

Dai, M., et al., 2020. "Assessing agricultural drought risk and its dynamic evolution characteristics." Agricultural Water Management 231: 106003.

EFRON, B. 2000. The bootstrap and modern statistics. *Journal of the American Statistical Association,* 95**,** 1293-1296.

FAN, G., ZHANG, Y., HE, Y. & WANG, K. 2017. Risk Assessment of Drought in the Yangtze River Delta Based on Natural Disaster Risk Theory. *Discrete Dynamics in Nature and Society,* 2017.

FOX, J. & WEISBERG, S., 2018. An R companion to applied regression, Sage Publications.

HASHEMI-ANA, S. K., KHOSRAVI, M. & TAVOUSI, T., 2015. Validation of AOGCMs capabilities for simulation length of dry spells under the climate change in Southwestern area of Iran. *Open J Air Pollut,* 4**,** 76-85.

KIM, H., PARK, J., YOO, J. & KIM, T.-W., 2015. Assessment of drought hazard, vulnerability, and risk: a case study for administrative districts in South Korea. *Journal of Hydro-environment Research,* 9**,** 28-35.

LABUDOVA, L., SCHEFCZYK, L. & HEINEMANN, G. The comparison of the SPI and the SPEI using COSMO model data in two selected Slovakian river basins. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014.

LIN, M.-L. & CHEN, C.-W., 2011. Using GIS-based spatial geocomputation from remotely sensed data for drought risk-sensitive assessment. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control,* 7**,** 657-668.

LITTLEWOOD, I., DOWN, K., PARKER, J. & POST, D. 1997. IHACRES–Catchment-scale rainfall-streamflow modelling (PC version) Version 1.0–April 1997. *The Australian National University, Institute of Hydrology and Centre for Ecology and Hydrology*.

LUBIS, M., TAKI, H., ANUROGO, W., PAMUNGKAS, D., WICAKSONO, P. & APRILLIYANTI, T. Mapping the distribution of potential land drought in Batam Island using the integration of remote sensing and geographic information systems (GIS). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017. IOP Publishing, 012012.

MA, M., REN, L., SINGH, V. P., YUAN, F., CHEN, L., YANG, X. & LIU, Y. 2016. Hydrologic model-based almer indices for drought characterization in the Yellow River basin, China. *Stochastic environmental research and risk assessment,* 30**,** 1401-1420.

MCKEE, T. B., DOESKEN, N. J. & KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993. American Meteorological Society Boston, MA, 179-183.

PANDEY, R. P., PANDEY, A., GALKATE, R. V., BYUN, H.-R. & MAL, B. C., 2010. Integrating hydro-meteorological and physiographic factors for assessment of vulnerability to drought. *Water resources management,* 24**,** 4199-4217.

PANDEY, S., PANDEY, A., NATHAWAT, M., KUMAR, M. & MAHANTI, N., 2012. Drought hazard assessment using geoinformatics over parts of Chotanagpur plateau region, Jharkhand, India. *Natural hazards,* 63**,** 279-303.

PEI, W., FU, Q., LIU, D., LI, T.-X., CHENG, K. & CUI, S., 2017. Spatiotemporal analysis of the agricultural drought risk in Heilongjiang Province, China. *Theoretical and Applied Climatology***,** 1-14.

PRATHUMCHAI, K., HONDA, K. & NUALCHAWEE, K. Drought risk evaluation using remote sensing and GIS: a case study in Lop Buri Province. 22nd Asian conference on remote sensing, 2001. 9.

REDUCTION, U. N. S. F. D., 2007. Drought risk reduction framework and practices: Contributing to the implementation of the hyogo framework for action. UNISDR Geneva (CH).

SAMANI, Z., 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of irrigation and drainage engineering,* 126**,** 265-267.

SHAHID, S. & BEHRAWAN, H. 2008. Drought risk assessment in the western part of Bangladesh. *Natural Hazards,* 46**,** 391-413.

SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K. B., TIGNOR, M. & MILLER, H. L., 2007. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2007. Cambridge University Press, Cambridge.

TIGKAS, D., VANGELIS, H. & TSAKIRIS, G., 2017. An enhanced effective reconnaissance drought index for the characterisation of agricultural drought. *Environmental Processes,* 4**,** 137-148.

TSAKIRIS, G., 2007. Practical application of risk and hazard concepts in proactive planning. *European Water,* 19**,** 47-56.

UNISDR, U., 2009. Terminology on disaster risk reduction. *Geneva, Switzerland*.

VALVERDE-ARIAS, O., GARRIDO, A., VALENCIA, J. L. & TARQUIS, A. M. 2018. Using geographical information system to generate a drought risk map for rice cultivation: Case study in Babahoyo canton (Ecuador). *Biosystems Engineering,* 168**,** 26-41.

VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S. & LÓPEZ-MORENO, J. I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate,* 23**,** 1696-1718.

VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S. & LÓPEZ-MORENO, J. I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate,* 23**,** 1696-1718.

WENTZ, F. J., RICCIARDULLI, L., HILBURN, K. & MEARS, C., 2007. How much more rain will global warming bring? *Science,* 317**,** 233-235.

WILHITE, D. A., HAYES, M. J., KNUTSON, C. & SMITH, K. H. 2000. Planning for Drought: Moving From Crisis to Risk Management 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association,* 36**,** 697-710.

WU, H. & WILHITE, D. A., 2004. An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska, USA. *Natural Hazards,* 33**,** 1-21.

Wu, Z., et al., 2018. "Climate and drought risk regionalisation in China based on probabilistic aridity and drought index." Science of the Total Environment 612: 513-521.

YADUVANSHI, A., SRIVASTAVA, P. K. & PANDEY, A., 2015. Integrating TRMM and MODIS satellite with socio-economic vulnerability for monitoring drought risk over a tropical region of India. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C,* 83**,** 14-27.

YUAN, X.-C., ZHOU, Y.-L., JIN, J.-L. & WEI, Y.-M., 2013. Risk analysis for drought hazard in China: a case study in Huaibei Plain. *Natural hazards,* 67**,** 879-900.